DOI:10.15928/j.1674-3075.2020.06.010

黑河干流浮游动物与水环境因子关系的多元分析

赵睿智,赵红雪,邱小琮

(宁夏大学生命科学学院,银川 750021)

摘要:研究浮游动物群落与水环境因子之间的关系,为黑河流域水体污染综合防治与生态恢复提供基础数据和理论依据。2015年4、7和12月监测黑河干流浮游动物密度、生物量与水环境因子,应用多元逐步回归分析、通径分析和典范对应分析方法进行研究。结果表明:黑河干流共鉴定浮游动物62种,其中轮虫8科21属44种,枝角类5科9属13种,桡足类2科4属5种。浮游动物种类以轮虫等小型个体为主,其密度、生物量及种群分布受到水环境因子的共同作用,各断面水环境因子的差异是浮游动物数量变动及分布情况不同的主要原因。上游浮游动物数量变动受水体叶绿素a和溶氧影响,高锰酸盐指数和总磷决定浮游动物的分布;中游浮游动物数量变动受叶绿素a和透明度制约,其分布与pH、溶氧、电导率、总磷、高锰酸盐指数、叶绿素a密切相关;影响下游浮游动物密度的主要因子是叶绿素a、溶氧、总磷和电导率,生物量则与叶绿素a、总氮和电导率相关,总磷和溶氧共同决定下游浮游动物的分布。

关键词:浮游动物;密度;生物量;多元分析;水环境因子;黑河

中图分类号:X173 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2020)06-0081-08

浮游动物(zooplankton)几乎存在于各种类型水体中,是淡水生态系统不可或缺的组成部分,在水生态系统物质循环与能量流动过程中具有承上启下的重要作用。研究表明,浮游动物对水体环境的变化比较敏感,水温、透明度、pH、溶解氧会直接决定浮游动物的群落结构(王家楫,1961;周竹君等,2000;殷旭旺等,2009;代梨梨,2013),水体的氮、磷、高锰酸盐指数(COD_{Mn})等因子对浮游动物群落结构和时空变化有较强的驱动作用。此外,水体中浮游植物的数量也会影响浮游动物的组成(贺诗水等,2009;李梦,2011;Jeppesen et al,2010)。不同类群的浮游动物对水环境响应的灵敏性有所差异,监测浮游动物群落结构及时空分布对水环境质量评价具有重要的应用价值(王新华等,2008)。

黑河是我国西北地区第2大内陆河,全长821 km,流域面积约14.29万km^2,横跨3种不同的自然环境单元(宁宝英等,2008)。随着流域内工农业迅速发展,人口增加,大量污染物排放,导致黑河水环境污染问题日趋严重,已影响到人民生活、生产用水安全。本文于2015年对黑河干流浮游动物密度、生物量、时空分布及相关水环境因子进行了调查,应用多元分析方法研究浮游动物群落与水环境因子之间的关系,旨在为黑河流域水体污染综合防治与生态恢复提供基础数据和理论依据。

1 研究区域与方法

1.1 样点的布设与采样时间

根据黑河的自然环境特征,以鹰落峡和正义峡为界将黑河干流分为上、中、下游3个区域。样点布设如图1。上游由野牛沟开始,穿祁连山至鹰落峡,共设12个采样点;中游由鹰落峡开始,过张掖、临泽、高台、金塔至正义峡,共设20个采样点;下游为额济纳河与东居延海,共设14个采样点。采样时间为2015年4、7、12月。

1.2 标本采集与鉴定、计数

轮虫等小型浮游动物定性样品用25号(0.064 mm)网拖取,枝角类和桡足类等大型浮游动物定性样品用13号(0.112 mm)网拖取,加入5%甲醛溶液固定。定量样品用5 L采水器分别在距离水体表层、底层0.5 m处采集水样,混合均匀后用25号网过滤浓缩于50 mL塑料瓶中,以5%甲醛溶液固定后低温保存带回实验室内进行浮游动物鉴定、计数。每瓶样品重复计数3次,取其均值计算该样品浮游动物密度(金相灿等,1990)。浮游动物的种类鉴定参考《中国淡水生物图谱》、《淡水微型生物图

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-05)。

作者简介:赵睿智,1992年生,男,硕士研究生,研究方向为动物学。E-mail:takuinugalaxy@sina.com

通信作者:邱小琮,1971年生,男,教授,主要从事水域生态学及水环境调控方面的教学与研究工作。E-mail:qxc7175@126.com

谱》。轮虫的生物量采用近似体积法计算，枝角类和桡足类的生物量以体长与体重归回方程法计算（王丽卿，2014）。

1.3 水环境因子测定

现场测定透明度（SD）、电导率（δ）、pH、溶解氧（DO）。在距离水体表层、底层 0.5 m 处分别采集水样混合后，按照《水质样品的保存和管理技术规定》（HJ 493－2009）中的要求处理、保存，带回室内测定总氮（TN）、总磷（TP）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、叶绿素 a 含量（Chl-a）等水环境因子指标。

总氮（TN）测定采用过硫酸钾消解紫外分光光度法（HJ 636－2012），总磷（TP）采用钼酸铵分光光度法（GB 11893－89），高锰酸盐指数（COD_{Mn}）采用滴定法（GB 11892－89），叶绿素 a（Chl-a）采用分光光度法（国家环保局，2002）。



图 1 黑河采样点分布示意

Fig.1 Location of the sampling sites in Heihe River

1.4 数据分析

1.4.1 逐步回归分析与通径分析 以浮游动物密度（ZD）、浮游动物生物量（ZB）为因变量，pH、DO、SD、δ、TN、TP、COD_{Mn}、Chl-a 为自变量，进行逐步回归分析，通过多次筛选保留效应显著的自变量，分别建立因变量和自变量之间最优的回归方程。通过计算通径系数，比较各水环境因子对浮游动物密度、生物量影响的主次顺序。为方便计算，所有的指标数据均转换为对数形式。

1.4.2 典范对应分析 筛选符合出现频率＞3、相对丰度≥0.5％的浮游动物种类，形成物种数据（邱小琮等，2012），pH、DO、SD、δ、TN、TP、COD_{Mn}、Chl-a 为环境数据。利用 Canoco4.5 对物种数据和环境数据进行典范对应分析（Canonical Correspondence Analysis，CCA），在同一排序图上反映浮游动物群落分布与水环境因子两者之间的关系。

2 结果与分析

2.1 浮游动物种类和群落组成

本次调查中，共鉴定浮游动物 62 种，其中轮虫 8 科 21 属 44 种，枝角类 5 科 9 属 13 种，桡足类 2 科 4 属 5 种。黑河干流浮游动物种类数随季节变化较为明显，7 月最多为 48 种，4 月次之 24 种，12 月最少只有 15 种（表 1）。浮游动物种类主要以轮虫为主，轮虫种类占浮游动物总种类数的比值分别为：4 月 70％、7 月 69％、12 月 93％。

表 1 黑河流域 2015 年浮游动物种类组成 种

Tab.1 Species composition of the zooplankton community in Heihe River

浮游动物	4 月	7 月	12 月
轮虫	17	33	14
枝角类	6	11	0
桡足类	1	4	1
总计	24	48	15

2.2 浮游动物与水环境因子的逐步回归分析

对黑河流域水环境因子与浮游动物密度、生物量进行逐步回归分析，确立了黑河上、中、下游浮游动物与水环境因子的逐步回归方程（表 2）。6 个逐步回归方程的相关系数均大于 0.7，D－W 统计量都趋近 2，因此逐步回归方程有效（邓建明等，2010）。

黑河上游浮游动物密度和生物量逐步回归方程入选的水环境因子自变量均为 Chl-a、COD_{Mn}、DO；中游浮游动物密度回归方程中，DO、Chl-a、SD、COD_{Mn} 4 种因子入选，浮游动物生物量的回归方程则进入了 Chl-a、DO、SD 3 种因子；黑河干流下游浮游动物密度的回归方程中 DO、SD、Chl-a、δ、pH、TP 6 个因子入选，进入浮游动物生物量回归方程的 5 个因子分别为 DO、SD、Chl-a、TN、δ。

2.3 浮游动物与水环境因子的通径分析

黑河上游浮动物与水环境因子的通径分析结果见表 3。上游浮游动物密度和生物量受 Chl-a 的直

接作用较大，COD_{Mn} 和 DO 次之，其中 COD_{Mn} 的直接作用表现为负向作用。COD_{Mn} 间接通过 Chl-a 和 DO 作用于浮游动物，呈现较强的正向作用。

中游浮游动物与水环境因子的通径系数如表 4。DO、Chl-a、SD 和 COD_{Mn} 对浮游动物密度的直接作用较大，DO 和 SD 作用为负向，Chl-a 作用为正向。Chl-a 通过对 DO、SD、COD_{Mn} 间接作用于浮游动物密度，为负向作用。Chl-a 对浮游动物的生物量直接作用最大，其次是 DO 和 SD。Chl-a 通过对 DO 和 SD 间接作用对生物量表现为负向作用。

表 2　浮游动物与水环境因子的逐步回归方程

Tab.2　Stepwise multiple regression between zooplankton and water environmental factors

		逐步回归方程	R	P
上游	密度	$\ln ZD=-79.610+14.379\ln Chl\text{-}a-14.507\ln COD_{Mn}+36.711\ln DO$	0.969	0.0001
	生物量	$\ln ZB=-4.727+1.956\ln Chl\text{-}a-1.978\ln COD_{Mn}+5.028\ln DO$	0.967	0.0001
中游	密度	$\ln ZD=10.121-4.013\ln DO+3615\ln Chl\text{-}a-2.640\ln SD-2.197\ln COD_{Mn}$	0.943	0.0001
	生物量	$\ln ZB=3.982+3.067\ln Chl\text{-}a-3.386\ln DO-1.425\ln SD$	0.937	0.0001
下游	密度	$\ln ZD=-15.172-6.766\ln DO-1.597\ln SD+6.439\ln Chl\text{-}a-4.330\ln\delta+35.175\ln pH-4.534\ln TP$	0.841	0.0001
	生物量	$\ln ZB=3.063-1.176\ln DO-0.248\ln SD+2.648\ln Chl\text{-}a-1.145\ln TN-1.01\ln\delta$	0.882	0.0001

注：ZD 代表浮游动物密度，ZB 代表浮游动物生物量 。

Note: ZD denotes zooplankton density, and ZB denotes zooplankton biomass.

表 3　上游浮游动物与水环境因子的通径系数

Tab.3　Path coefficient analysis of zooplankton and water environmental factors for the upper Heihe River

因变量	自变量	直接作用	间接作用 $r_{ij}P_j$			决定
		P_i	通过 lnChl-a	通过 $\ln COD_{Mn}$	通过 lnDO	系数
lnZD	lnChl-a	0.907		-0.121	0.160	0.986
	$\ln COD_{Mn}$	-0.609	0.180		0.274	
	lnDO	0.529	0.274	-0.315		
lnZB	lnChl-a	0.912		0.166	-0.122	0.982
	$\ln COD_{Mn}$	-0.615	0.181		0.284	
	lnDO	0.548	0.276		-0.319	

注：ZD 代表浮游动物密度，ZB 代表浮游动物生物量。

Note: ZD denotes zooplankton density, and ZB denotes zooplankton biomass.

表 4　中游浮游动物与水环境因子的通径系数

Tab.4　Path coefficient analysis of zooplankton and water environmental factors for the middle Heihe River

因变量	自变量	直接作用	间接作用 $r_{ij}P_j$				决定
		P_i	通过 lnDO	通过 lnChl-a	通过 lnSD	通过 $\ln COD_{Mn}$	系数
lnZD	lnDO	-0.477		0.294	-0.216	-0.032	0.737
	lnChl-a	1.020	-0.137		-0.619	-0.059	
	lnSD	-0.890	-0.116	0.710		-0.026	
	$\ln COD_{Mn}$	-0.159	-0.097	0.381	-0.148		
lnZB	lnChl-a	1.048	-0.384	-0.139			0.704
	lnDO	-0.482	-0.134		0.302		
	lnSD	-0.551		-0.117	0.730		

注：ZD 代表浮游动物密度，ZB 代表浮游动物生物量。

Note: ZD denotes zooplankton density, and ZB denotes zooplankton biomass.

黑河下游浮游动物与水环境因子的通径系数如表 5。Chl-a 和 pH 对浮游动物的密度呈现为正向直接作用，DO、SD、TP、δ 则表现为负向直接作用。各水环境因子对浮游生物密度的正向间接作用主要体现在 SD、TP、δ、pH 对 Chl-a 的影响，DO 通过 Chl-a 对浮游生物密度呈负向的间接作用。下游浮游动物的生物量受到 Chl-a 的正向直接作用大于 TN，负向直接作用中 δ 较 DO、SD 强。SD、TN 和 δ 通过 Chl-a 对浮游动物生物量有正向间接作用，DO 通过 Chl-a 表现为负向间接作用。

2.4　浮游动物与水环境因子的典范对应分析

从黑河干流 62 种浮游动物中筛选出进行典范对应分析的 30 种，物种及代码见表 6。黑河上、中、下游水环境因子数据以及浮游动物生物量数据 CCA 排序结果见表 7、图 2。

表5 下游浮游动物与水环境因子的通径系数

Tab.5 Path coefficient analysis of zooplankton and water environmental factors for the lower Heihe River

因变量	自变量	直接作用 P_i	间接作用 $r_{ij}P_j$							决定系数
			通过 lnDO	通过 lnSD	通过 lnChl-a	通过 lnδ	通过 lnpH	通过 lnTP	通过 lnTN	
lnZD	lnDO	-0.138		0.029	-0.990	0.088	-0.078	0.184		0.886
	lnSD	-0.163	0.024		1.088	-0.190	0.135	-0.405		
	lnChl-a	1.817	0.075	-0.098		-0.242	0.214	-0.550		
	lnδ	-0.270	0.045	-0.114	1.624		0.219	-0.572		
	lnpH	0.239	0.045	-0.092	1.627	-0.248		-0.573		
	lnTP	-0.612	0.041	-0.108	1.634	-0.253	0.224			
lnZB	lnDO	-0.245		0.043	-0.549	0.255			-0.129	0.853
	lnSD	-0.245	0.043		0.603	-0.549			0.271	
	lnChl-a	1.007	0.134	-0.147		-0.699			0.367	
	lnTN	0.402	0.079	-0.165	0.920	-0.752				
	lnδ	-0.782	0.080	-0.172	0.900				0.386	

注:ZD代表浮游动物密度,ZB代表浮游动物生物量。

Note: ZD denotes zooplankton density, and ZB denotes zooplankton biomass.

表6 CCA排序图中浮游动物种类代码

Tab.6 Codes of zooplankton species for canonical correspondence analysis (CCA)

代码	种 类	代码	种 类
S1	螺形龟甲轮虫(*Keratella cochlearis*)	S16	尖角单趾轮虫(*Monostyla hamata*)
S2	矩形龟甲轮虫(*Keratella quadiata*)	S17	梨形单趾轮虫(*Monostyla pyriformis*)
S3	曲腿龟甲轮虫(*Keratella vaigavalga*)	S18	透明须足轮虫(*Euchlanis pellucida*)
S4	角突臂尾轮虫(*Brachionus angularis*)	S19	钝角狭甲轮虫(*Colurella obtusa*)
S5	萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)	S20	盘状鞍甲轮虫(*Lepadella patella*)
S6	月形腔轮虫(*Lecane luna*)	S21	三翼鞍甲轮虫(*Lepadella heterostyla*)
S7	弯角腔轮虫(*Lecane curvicornis*)	S22	薄片鳞冠轮虫(*Squatinella lamellaris*)
S8	长三肢轮虫(*Filinia longiseta*)	S23	尖削叶轮虫(*Notholca acuminata*)
S9	迈氏长三肢轮虫(*Filinia maior*)	S24	梳状疣毛轮虫(*Synchaeta pecitinata*)
S10	广生多肢轮虫(*Polyarthra trigla*)	S25	裸腹溞(*Moina* sp.)
S11	前节晶囊轮虫(*Asplanchna priodonta*)	S26	镰形顶冠溞(*Camplocerus harphae*)
S12	纵长异尾轮虫(*Trichocerca elongta*)	S27	短尾秀体溞(*Diaphanosoma brachyurum*)
S13	冠饰异尾轮虫(*Trichocerca lophoessa*)	S28	短刺近水蚤(*Tropocyclops* sp.)
S14	细异尾轮虫(*Trichocerca gracilis*)	S29	广布中剑水蚤(*Mesocyclops leuckarti*)
S15	对棘同尾轮虫(*Diurella stylata*)	S30	无节幼体(Nauplius)

表7 环境因子与前两个排序轴之间的相关系数

Tab.7 Correlation coefficients of water environmental factors and the first two axes of CCA for the main stem of Heihe River

	上游		中游		下游	
	SPEC AX1	SPEC AX2	SPEC AX1	SPEC AX2	SPEC AX1	SPEC AX2
SPEC AX1	1		1		1	
SPEC AX2	0	1	0.015	1	0.032	1
ENVI AX1	1.000**	0	0.995**	0	0.963**	0
ENVI AX2	0	1.000**	0	0.891**	0	0.991**
pH			-0.627**	0.302	-0.1	0.227
DO	0.757*	-0.485	0.725**	-0.039	0.174	-0.515*
δ	-0.208	0.435	-0.868**	-0.064	-0.04	0.002
TN	0.729*	-0.186	-0.397	0.289	-0.037	0.113
TP	0.018	0.971**	-0.678**	0.093	-0.018	0.283*
COD_{Mn}	0.980**	0.101	-0.620**	-0.018	-0.02	-0.008
SD	0.27	-0.601	0.294	-0.17	-0.013	0.247
Chl-a	0.296	-0.787*	0.709**	-0.375	-0.153	0.182

注:SPECAX1:物种排序轴1;SPEC X2:物种排序轴2;ENVIAX1:环境因子排序轴1;ENVIAX2:环境因子排序轴2。* $P<0.05$,** $P<0.01$。

Note: SPECAX1: zooplankton species ordination AX1; SPEC X2: zooplankton species ordination AX2; ENVIAX1: environmental factor ordination AX1; ENVIAX2: environmental factor ordination AX2. * $P<0.05$,** $P<0.01$.

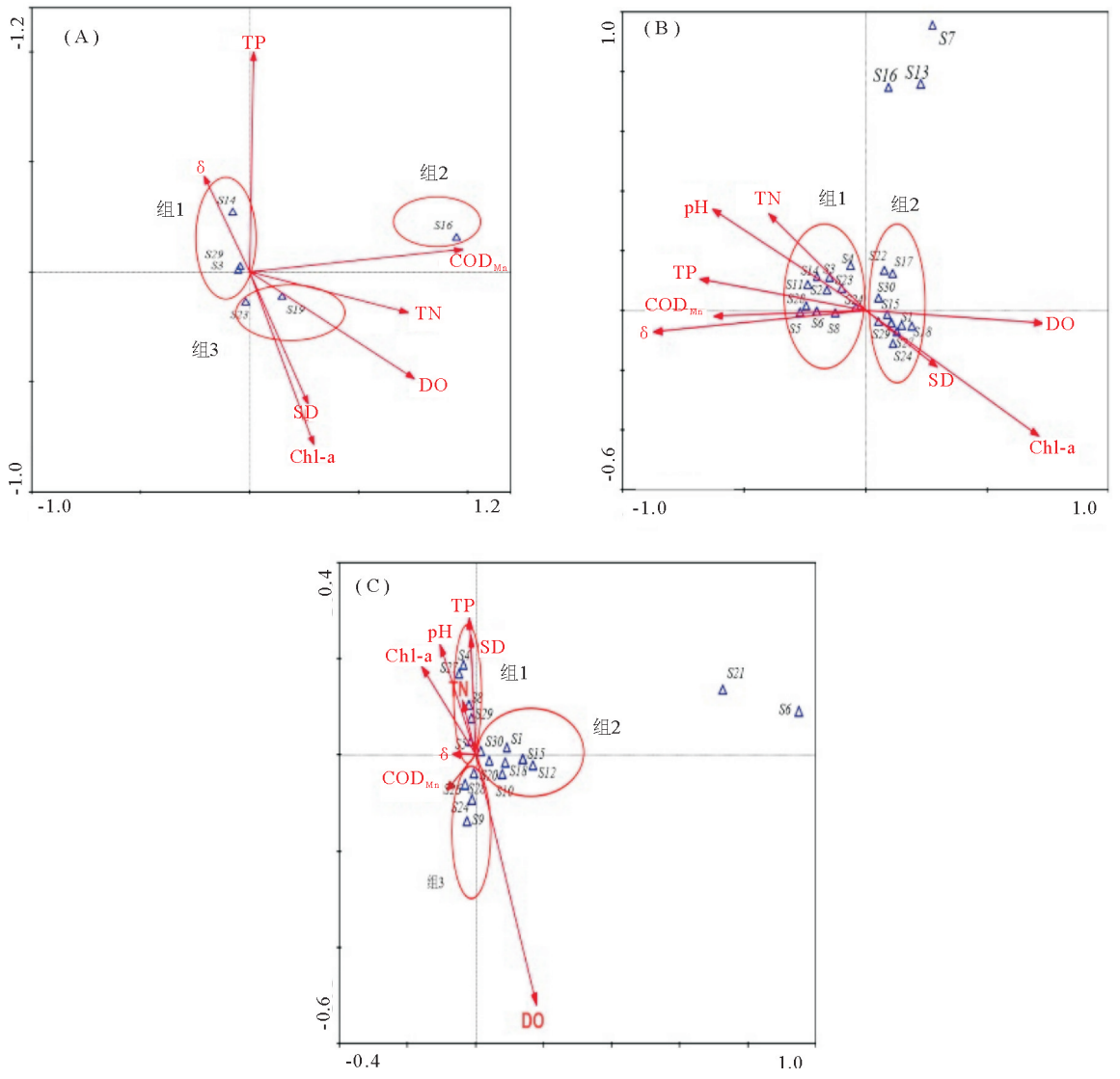


图 2　浮游动物与水环境因子的 CCA 排序

Fig.2　CCA ordination biplots between zooplankton species and water environmental factors

上游 CCA 排序结果显示，以浮游动物作为物种数据前 2 个排序轴的特征值分别为 0.597 和 0.117，共揭示了 63.1%的信息量，环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数为 1.000，水环境因子 2 个排序轴之间相关系数为 0；中游 CCA 排序中，前 2 个排序轴的特征值分别为 0.690 和 0.604，揭示了 81.6%的信息量，环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数为 0.995 和 0.891，水环境因子排序轴之间的相关系数为 0.0148；下游 CCA 排序中，前 2 个排序轴的特征值分别为 0.881 和 0.690，共揭示了 87.8%的信息量，环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数为 0.963 和 0.991，水环境因子 2 个排序轴之间相关系数为 0.0315。这表明排序结果有效可靠（柴毅等，2014）。

黑河上、中、下游 3 个区域内浮游动物群落结构与环境因子相关性差异较大。上游浮游动物群落主要由细异尾轮虫（*S*14）、曲腿龟甲轮虫（*S*3）和尖角单趾轮虫（*S*16）等小型浮游动物构成；COD_{Mn}、DO、TN 和 TP 与浮游动物群落结构呈正相关关系，与 Chl-a 成负相关关系，其他水环境因子影响不显著（$P>0.05$）；COD_{Mn} 相关系数最高（0.980），Chl-a 相关系数最低（−0.787）。中游浮游动物种类组成较为复杂，除轮虫外短尾秀体溞（*S*27）、广布中剑水溞（*S*29）等大型浮游动物共同受到 Chl-a 和 DO 的正向影响，其相关系数分别为 0.709 和 0.725，而 δ、TP 以及 COD_{Mn} 与浮游动物群落结构呈负相关关系，其余因子无显著影响（$P>0.05$）。下游浮游动物种类数较中游减少，并趋向于大型化发展，浮游动物群落结构与 TP 呈正相关关系，与 DO 呈负相关关系，相关系数分别为 0.283 和 −0.515。经分析，COD_{Mn} 是

上游断面浮游动物群落结构的首要影响因子($P<0.01$),中游断面为δ($P<0.01$),下游断面为DO($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 黑河干流浮游动物与水环境因子的关系

DO是浮游动物生存的重要因子之一,DO水平直接决定浮游动物密度、生物量的大小(吴利等,2011)。Chl-a是衡量浮游植物的主要指标,而浮游植物作为浮游动物天然食物,其在水体中的密度与浮游动物生长繁殖密切相关(杨宇峰等,2000)。本研究中,DO和Chl-a均入选浮游动物密度和生物量的逐步回归方程,其中,Chl-a通过直接或间接的作用与各断面浮游动物密度与生物量成相关关系。DO对流域上游浮游动物密度和生物量的影响属于正向直接作用,但在中游和下游与浮游动物密度和生物量呈负相关关系,且中游负向直接作用强于下游,其原因在于各断面耗氧因子含量及初级生产力的差异。上游水体为贫营养或轻度富营养状态,初级生产力与浮游动物为正相关关系。中游水体为中度富营养化状态,水中有机污染物、悬浮物等耗氧因子含量快速上升,水体中DO收支失衡,从而影响浮游动物的数量变化。下游水体呈现重度富营养化状态,虽然有机污染物的含量依旧不低,但水中悬浮物逐渐沉淀,初级生产力增加,DO收支趋于平衡(杨永宇,2017;王明珠等,2013),浮游动物较中游区域有良好的生存条件,因此DO的负向直接作用低于中游。

SD在一定程度上能够作为判定浮游植物密度的指标,SD越高浮游植物数量越少,反之则浮游植物数量越高(蒋嫣红等,2012)。SD对黑河中游浮游动物密度的直接影响为负向,对生物量的间接作用大于直接作用,主要通过Chl-a间接影响浮游动物生物量,最终表现为正向;下游浮游动物密度及生物量的变化受到SD直接影响较小,SD主要通过Chl-a的正向间接作用于浮游动物。

COD_{Mn}能够反映水体受到有机物污染的程度,除了一些耐污种类外,水体的污染程度与浮游动物数量有显著的相关性(李强等,2015)。COD_{Mn}对上游浮游动物密度和生物量有较强的直接作用,并且表现为负向;中游浮游动物的密度受到COD_{Mn}通过Chl-a的间接作用,表现为正向。COD_{Mn}未能够成为影响下游浮游动物数量变动的主要因素,其原因在于大量的营养盐随水流进入黑河下游,氮、磷的富集削弱了有机污染物对浮游动物的影响。

不同的浮游动物对pH适应性不同,因此pH是影响浮游动物分布情况的因子之一(范凯,2007)。pH对下游浮游动物密度的直接作用和间接作用都为正向,间接作用大于直接作用;上中游的回归方程虽然并未选入此因子,但pH依然通过Chl-a间接影响浮游动物的密度或生物量。

黑河下游TP通过对Chl-a正向的间接影响抵消了其对浮游动物密度的负向直接作用,最终表现为正相关;TN对浮游动物生物量的直接作用为正向,通过Chl-a的间接作用较强,亦为正向。这印证了氮、磷等营养盐对浮游动物有重要影响的根本原因是浮游植物吸收营养盐后群落结构及数量动态发生了明显的变化(Hessen et al,2006;陈光荣等,2010)。

除TN、TP外,δ也是描述水体盐度的指标之一,有研究表明δ能够进一步解释营养盐对浮游动物的作用(Hessen et al,2006;夏品华等,2011)。本研究中,虽然δ对下游浮游动物密度和生物量的直接作用为负向,但其通过Chl-a的间接作用较强,最终入选回归方程。

3.2 水环境因子对游动物分布的影响

黑河上游流域属中山溪流水生态系统(许莎莎,2012),地势高、温度低且水流湍急,水生植物分布少,水体自净能力较弱,浮游动物群落主要以小型轮虫构成,尖削叶轮虫、钝角狭甲轮虫、细异尾轮虫等寡污性种类(王庆等,2014;梁迪文等,2016)数量占优势。DO、TN和Chl-a对浮游动物的分布有显著影响($P<0.05$),COD_{Mn}及TP对浮游动物的分布有极显著影响($P<0.01$)。这说明COD_{Mn}和TP是影响黑河上游浮游动物群落结构和分布的主要因素。

黑河流域是黑河干流主要的开发利用区域(许莎莎,2012),受到人类工业生产活动的影响严重。但地势平稳、温度适宜,浮游植物数量大幅增加,促进了浮游动物的生长繁殖(王庆等,2014)。浮游动物种类数增多,且出现枝角类、桡足类等大型浮游动物,矩形龟甲轮虫、角突臂尾轮虫、广生多肢轮虫、梳状疣毛轮虫、短尾秀体溞等代表性中污染指示种丰度较高(王庆等,2014;梁迪文等,2016)。经过综合分析,可以认为pH、DO、δ、TP、COD_{Mn}和Chl-a($P<0.01$)是影响黑河中游浮游动物群落结构和分布的主要因素。

黑河下游东居延海属于内陆湖水生态系统(许莎莎,2012),随水进入的大量污染物在东居延海内

不断富集，湖区内鸟类活动繁盛，排出的粪便也导致水体中氮磷等因子严重超标。浮游动物群落多样性降低，萼花臂尾轮虫、广生多肢轮虫、前节晶囊轮虫、梳状疣毛轮虫、短尾秀体溞等中污性指示种类（郭飞飞，2016；袁雅琴等，2017）数量大幅增加。有研究指出，随着氮磷含量的增加，浮游动物群落结构会出现改变（梁迪文等，2016）。TP 含量的增加会导致湖泊中浮游动物的种类数量减少（Jeppesen et al，2010）。因此，TP 和 DO（$P<0.05$）是影响黑河下游浮游动物群落结构和分布的主要因素。

参考文献

柴毅，彭婷，郭坤，等，2014. 海子湖春季浮游植物群落结构与环境因子相关性分析[J]. 水生态学杂志，35(2)：56－62.

陈光荣，雷泽湘，谭镇，等，2010. 环境因子对广东城市湖泊后生浮游动物的影响[J].水生态学杂志，31(4)：28－32.

代梨梨，2013. 浮游动物群落对水环境改变响应机制的研究[D]. 北京：中国科学院大学.

邓建明，蔡永久，陈宇炜，等，2010. 洪湖浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学，22(1)：70－78.

范凯，2007. 渤海湾浮游动物群落结构及水质生物学评价[D]. 天津：天津大学.

郭飞飞，张云，赵广，等，2016. 金沙河水库浮游动物群落结构及其与环境因子的关系[J].生态学杂志，35(8)：2208－2216.

国家环保局，2002. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京：中国环境科学出版社.

贺诗水，王洪凯，徐汗福，2009. 水库中枝角类种群数量变化与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学，37(3)：1128－1129.

蒋嫣红，程婧蕾，王丽卿，2012. 公园水体浮游植物与环境因子的关系[J]. 生态学杂志，31(3)：606－613.

金相灿，屠清瑛，1990. 湖泊富营养化调查规范[M].2 版.北京：中国环境科学出版社.

李梦，2011. 原生动物，细菌和有机质系统的动力学行为[D]. 长春：东北师范大学.

李强，田华，姜民，等，2015. 淀山湖浮游动物群落结构特征及其影响因子[J]. 水生态学杂志，36(4)：69－77.

梁迪文，王庆，魏南，等，2017. 广州市不同类型水体轮虫群落结构的时空变动及与理化因子间的关系[J].湖泊科学，29(6)：1433－1443.

宁宝英，何元庆，和献中，等，2008. 黑河流域水资源研究进展[J].中国沙漠，28(6)：1180－1185.

邱小琮，赵红雪，孙晓雪，2012. 沙湖浮游动物与水环境因子关系的多元分析[J]. 生态学杂志，31(4)：896－901.

王家楫，1961. 中国淡水轮虫志[M].北京：科学出版社.

王丽卿，2014. 水生生物学实验指导[M]. 科学出版社：171－210.

王明珠，张运林，刘笑菡，等，2013. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征[J]. 湖泊科学，25(4)：505－513.

王庆，侯磊，陈实，等，2014. 珠江口磨刀门轮虫群落结构特征与水质生态学评价[J].生态环境学报，(5)：824－833.

王新华，王宏鹏，纪炳纯，2008. 天津市团泊水库浮游动物研究与水环境评价[J]. 四川动物，27(5)：807－809.

吴利，冯伟松，张堂林，等，2011. 春、秋季武湖浮游动物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 水生态学杂志，32(2)：31－37.

夏品华，马健荣，李存雄，等，2011. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学研究，24(4)：378－386.

许莎莎，2012. 黑河流域水生态功能分区研究[D]. 兰州：兰州大学.

杨永宇，2017. 黑河流域水环境因子分析及水环境质量综合评价[D]. 银川：宁夏大学.

杨宇峰，黄祥飞，2000，浮游动物生态学研究进展[J]. 湖泊科学，12(1)：81－89.

殷旭旺，牛翠娟，2009. pH 对 5 种臂尾轮虫后代存活率和混交雌体率及种群内禀增长率的影响[J]. 水生生物学报，33(2)：342－347.

袁雅琴，周春丽，高海燕，等，2017. 太湖典型入湖河流莲花荡浮游动物群落的季节演替及其环境指示意义初步研究[J].动物学杂志，52(5)：812－823.

周竹君，刘青，宋智修，等，2000. pH 和几种金属离子对褶皱臂尾轮虫增殖的影响[J]. 大连海洋大学学报，15(2)：119－123.

Hessen D O，Faafeng B A，Smith V H，et al，2006. Extrinsic and intrinsic controls of zooplankton diversity in lakes[J]. Ecology，87(2)：433－443.

Jeppesen E，Peder Jensen J，Sϕndergaard M，et al，2000. Trophic structure，species richness and biodiversity in Danish lakes：changes along a phosphorus gradient[J]. Freshwater biology，45(2)：201－218.

（责任编辑　张俊友　郑金秀）

Relationship of Zooplankton and Water Environmental Factors in the Main Stem of Heihe River

ZHAO Rui-zhi, ZHAO Hong-xue, QIU Xiao-cong

(School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, P.R.China)

Abstract: Heihe River is the second largest inland river in northwest China, with a basin area of 14.29×10^4km. With rapid development of industry and agriculture in the basin, pollutant discharges to the river have increased, leading to serious deterioration of water quality. In this study, we investigated the zooplankton community structure in the main stem of Heihe River in 2015 and analyzed its relationship with water environmental factors using multiple stepwise regression, path coefficient analysis and canonical correspondence analysis (CCA). The aim was to provide baseline and theoretical evidence for comprehensive prevention and control of water pollution as well as ecological restoration in the Heihe River basin. In April, July, and December of 2015, a zooplankton investigation was carried out at 46 sampling sites in the upper, middle and lower reaches of Heihe River, focusing on zooplankton density and biomass. Water environmental factors were also measured including transparency, conductivity, dissolved oxygen (DO), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), pH, permanganate Index (COD_{Mn}) and chlorophyll a (Chl-a). A total of 62 zooplankton species was identified, including 44 rotifer species (22 genera, 8 families), 13 cladocera species (9 genera, 5 families) and 5 copepoda species (4 genera, 2 families). The zooplankton community was dominated by the small rotifers. Water environmental factors affected the density, biomass and distribution of zooplankton and were primarily responsible for variations in the zooplankton distribution of different river sections. The density and biomass of zooplankton in the upper reach of Heihe river were affected by Chl-a and DO levels, and the distribution was related to COD_{Mn} and TP. Chl-a and water transparency were the primary factors affecting zooplankton density and biomass in the middle reach, and distribution was closely related to pH, DO, conductivity, TP, COD_{Mn} and Chl-a. The primary factors affecting zooplankton density in the lower reach were DO, Chl-a, TP and conductivity, while biomass was related to Chl-a, TN and conductivity. The distribution of zooplankton in the lower reach was related to TN and DO.

Key words: zooplankton; density; biomass; multiple analysis; water environmental factors; Heihe River